

**XXIV CONGRESO LATINOAMERICANO DE HIDRÁULICA
PUNTA DEL ESTE, URUGUAY, NOVIEMBRE 2010**

**CUANTIFICANDO LA NO ESTACIONARIEDAD
DEL CLIMA DE PRECIPITACIONES EN URUGUAY**

Rafael Terra

Instituto de Mecánica de los Fluidos e Ingeniería Ambiental - IMFIA

Facultad de Ingeniería, Universidad de la República, Uruguay

rterra@fing.edu.uy

RESUMEN:

Es conocido el incremento significativo de la precipitación en el Sureste de América del Sur -y en particular en Uruguay- durante las últimas décadas, el cual se manifestó principalmente durante la estación cálida. Dicho incremento se ve reflejado en las variables hidrológicas donde se verifican fuertes tendencias en los escurrimientos superficiales. Estas tendencias coinciden, al menos cualitativamente, con los escenarios climáticos existentes para la región. Resultados semejantes se repiten en otras regiones, lo cual ha llevado a algunos autores a hablar de la muerte de la estacionariedad como presupuesto sobre el que basar el análisis, predicción y diseño hidrológico. En este trabajo se cuantifican y analizan las consecuencias de dichas tendencias en la práctica usual de estimar el clima esperado en base a la climatología histórica con diversas extensiones en el tiempo, típicamente 30 años. Los resultados se expresan como sesgos respecto de la distribución esperada (en particular en la frecuencia de deciles extremos y cuartiles), cuya significancia estadística se comprueba. Se encuentra que en ningún caso se justifica la utilización de todo el registro disponible para la estimación del clima esperado de precipitación en Uruguay; aún la práctica usual de tomar 30 años (e incluso 25 años) no parece aconsejable debido a que produce sesgos muy significativos en dos de las tres regiones analizadas. Las tendencias, y sesgos asociados, se manifiestan ya en el período 1949-78 y se acentúan en los 30 años siguientes.

ABSTRACT:

It is well known that precipitation in Southeastern South America -and in particular in Uruguay- has shown positive trends on recent decades, mostly during the warm season. The enhanced rainfall is also expressed on the hydrological variables with a marked increase on surface runoff. These tendencies qualitatively coincide with future climate scenarios for the region. Similar findings in other regions have prompted some authors to proclaim the death of stationarity as the foundation on which to base hydrological analysis, predictions and designs. In this study we quantify and analyze the consequence that the observed precipitations tendencies (climate non-stationarity) have on the regular practice of estimating expected climate based on historical records of a given length, typically 30 years. Results, and their statistical significance, are presented as biases with respect to the expected distribution, in particular on the frequency of occurrence of the quartiles and extreme deciles. It is found that the determination of the expected precipitation climate in Uruguay based on the entire historical record renders unacceptable biases in all cases. Even the usual practice of taking 30 year data (and also 25 years) is not recommended since it generates very significant biases in two of the three regions considered. The tendencies, and associated biases, are already apparent during the period 1949-78, and deepen during the following 30 years.

PALABRAS CLAVES: Cambio climático, precipitación, Uruguay

INTRODUCCIÓN

Es conocido el incremento significativo de la precipitación media en el Sureste de América del Sur (PICC, 2007) y en particular en Uruguay durante las últimas décadas. Este incremento se manifestó principalmente durante el verano (Berbery et al, 2006) y se ve también reflejado en las variables hidrológicas donde se verifican fuertes tendencias en los escurrimientos superficiales (Menéndez y Berbery 2006).

Resultados semejantes se repiten en otras regiones, lo cual ha llevado a algunos autores a hablar de la muerte de la estacionariedad (Milly et al, 2008) como presupuesto sobre el que basar análisis, predicciones y diseños hidrológicos. Pielke (2009) va más allá y argumenta que, junto con la idea de que el clima varía dentro de una distribución fija en el tiempo, cae también el paradigma de toma de decisiones en base a predicciones, aún en sentido probabilístico, y plantea modelos alternativos.

Se dirá que el clima nunca fue estrictamente estacionario y que hoy, si bien cambiante, no es totalmente errático. La diferencia es más cuantitativa que cualitativa. En otras palabras, la aceleración del cambio vuelve la hipótesis de estacionariedad, que siempre fuera aproximada, en inadecuada, poniendo en cuestión la práctica usual estimar la distribución del clima esperado de una variable en función del registro histórico de una longitud dada, típicamente 30 años.

Hay que hacer notar que los escenarios climáticos de precipitación para la región (PICC, 2007) coinciden cualitativamente con lo que se ha observado en las últimas décadas, lo cual refuerza la noción de que estos últimos (los cambios observados) tienen una componente relacionada con el cambio climático de origen antropogénico debido al aumento de los gases de efecto invernadero. Lamentablemente, las incertidumbres en los escenarios de precipitación a futuro no permiten determinar si las tendencias observadas se mantendrán o profundizarán a futuro.

Dentro del panorama de incertidumbre inevitable, es importante al menos cuantificar cuál ha sido el impacto de las tendencias observadas en el pasado sobre los sesgos en que se incurre al estimar el clima futuro de una variable en función del registro histórico de una longitud dada. El objetivo de este trabajo es, por tanto, cuantificar dichos sesgos en la precipitación mensual en Uruguay que resultan de aplicar sistemáticamente en el pasado la metodología usual de estimar la distribución esperada en función del registro observado.

DATOS y METODOLOGÍA

Se utilizaron 90 años de registros pluviométricos mensuales (1919-2008) de las estaciones de la Dirección Nacional de Meteorología que se presentan en la Figura 1 y Tabla 1.

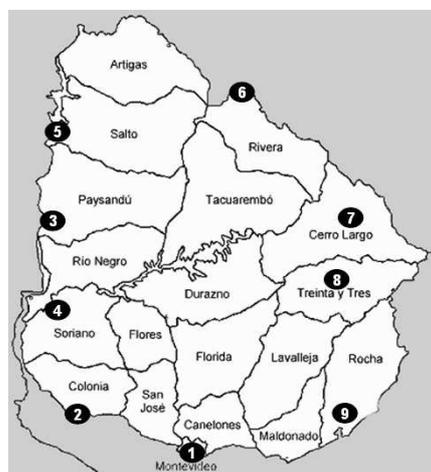


Figura 1.- Localización de las estaciones pluviométricas. Ver Tabla 1.

Tabla 1.- Significancia estadística de tendencias crecientes en los registros pluviométricos según test de Kendall-Mann (subrayado >95%, negrita >99%)

Estación Pluviométrica	Tendencia [mm/año]	Significancia Estadística		
		Anual	Verano	Invierno
1 Prado	1,7	99,7 %	99,9 %	55,9 %
2 Colonia	2,3	99,9 %	99,9 %	39,4 %
3 Paysandú	2,7	99,6 %	99,9 %	23,5 %
4 Mercedes	5,2	99,9 %	99,9 %	93,2 %
5 Salto	4,4	99,0 %	99,9 %	92,2 %
6 Rivera	3,6	99,0 %	99,5 %	86,4 %
7 Melo	5,5	99,9 %	99,9 %	99,9 %
8 Treinta y Tres	4,7	99,9 %	99,9 %	<u>97,5 %</u>
9 Rocha	4,4	99,9 %	99,9 %	<u>98,6 %</u>

Como análisis preliminar se realizó el test de tendencia de Kendall-Mann para los totales anuales y estacionales: verano (Oct.-Mar.) e invierno (Abr.-Set.) en cada registro (ver Tabla 1). Se corroboran los resultados ya adelantados: tendencias crecientes muy significativas, sobretodo en verano, y se verifican algunas variaciones regionales. En función de la intensidad y robustez estadística en las tendencias observadas y de la distribución geográfica (Figura 1) se definen 3 regiones homogéneas (sombreadas en la Tabla 1):

- Región Suroeste (Prado, Colonia, Paysandú)
- Región Noroeste (Mercedes, Salto, Rivera)
- Región Este (Melo, Treinta y Tres, Rocha).

En la Figura 2 se presentan las series temporales para el período de estudio de la precipitación anual en las regiones anteriormente definidas.

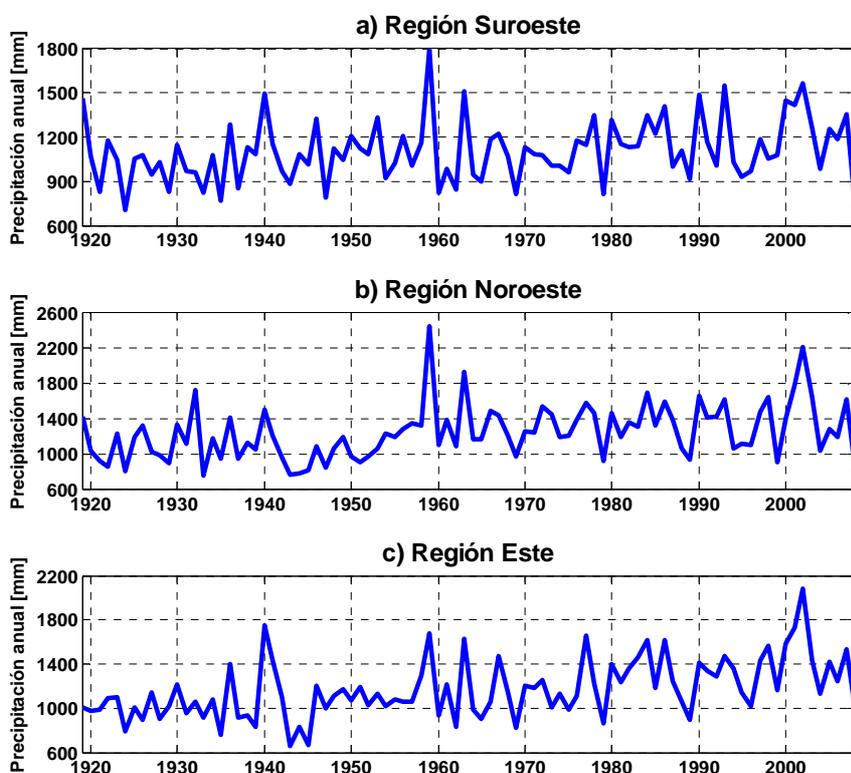


Figura 2.- Total de precipitación anual en las regiones definidas para el período de estudio.

Se consideran los últimos 60 años (1949-2008) de las series disponibles (1919-2008) y, para cada año, se estima el clima esperado en función de:

- (i) todo el registro desde 1918 al año inmediato anterior al considerado
- (ii) los últimos N años inmediatos precedentes, con N=30, N=25 y N=20, respectivamente

A continuación, se calcula el percentil del registro de cada año en relación a la distribución esperada para dicho año, estimada según (i) y (ii), con los diversos valores de N. En particular, se cuentan los casos que caen en los deciles extremos y en cada cuartil. En un clima estacionario, y a menos del efecto del azar cuyos límites de significancia son calculados, los 60 años considerados poblarían uniformemente la distribución esperada (que va variando año a año), cayendo con igual probabilidad en cada cuartil.

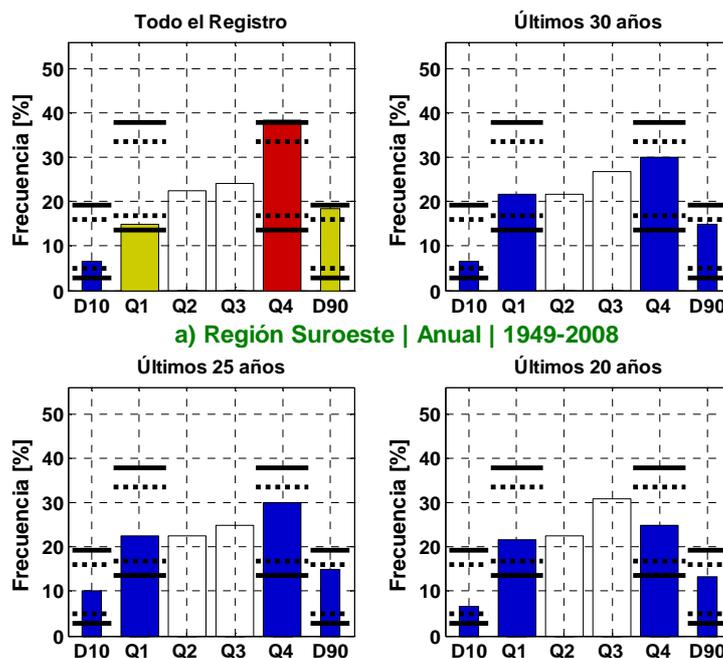
Se repitió la metodología descrita para registros individuales y promedios regionales y para varias temporadas del año y sub-períodos dentro de los años disponibles. Por cuestión de espacio se muestran solo resultados regionales según las regiones definidas anteriormente.

RESULTADOS y DISCUSIÓN

Totales de precipitación anual

En el caso en que el clima esperado se estima con todo el registro pluviométrico previo, las 3 regiones muestran sesgos significativos en los cuartiles y deciles extremos (Figura 3). En particular, en las regiones Noroeste y Este, los cuartiles y deciles inferiores (superiores) muestran sesgos negativos (positivos) con una significancia del 99%. La región Suroeste presenta sesgos menores pero, en el caso del cuartil superior, igual son significativos al 99%. Los sesgos más importante son en la región Este, donde el cuartil superior ocurre con una frecuencia del 55% y el decil superior se supera en un 20% de los años.

Estimando el clima esperado en base a los últimos 30 años (práctica usual) o 25 años, la frecuencia de años en el cuartil superior es significativamente mayor a lo esperado (al 99%) tanto en la región Este como en la Noroeste.



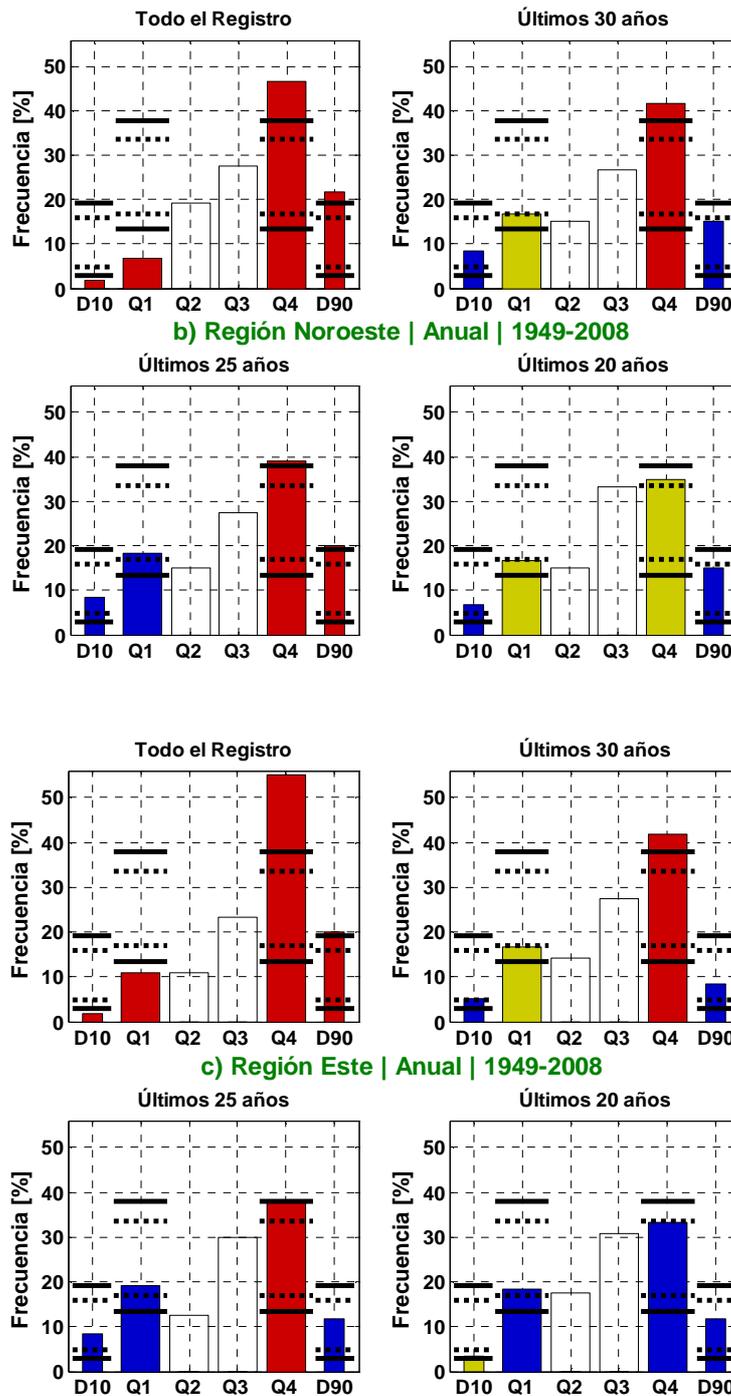


Figura 3.- Frecuencia de deciles extremos y cuartiles de la precipitación anual en las regiones: a) Suroeste, b) Noroeste y c) Este, respecto del clima esperado y estimado según los 4 criterios indicados. Líneas llenas (punteadas) y barras rojas (amarillas) indican niveles de 99% (95%) de significancia estadística.

Aún considerando el clima en base a los 20 años más recientes, y si bien la frecuencia de los cuartiles extremos no se diferencia significativamente de lo esperado, se observa que en las regiones Este y Noroeste, un 64% y 68% de los años, respectivamente, se ubican por encima de la mediana (Q3 + Q4), lo cual es significativamente mayor a lo esperado al 98% y 99%.

Es de interés analizar si las tendencias verificadas, y los sesgos que ocasionan con la presente metodología, se han ido acentuando dentro del período de 60 años analizados, para lo cual se repite el análisis para dos sub-períodos de 30 años. Se presentan resultados solo para la región Este y para N=30 y N=20.

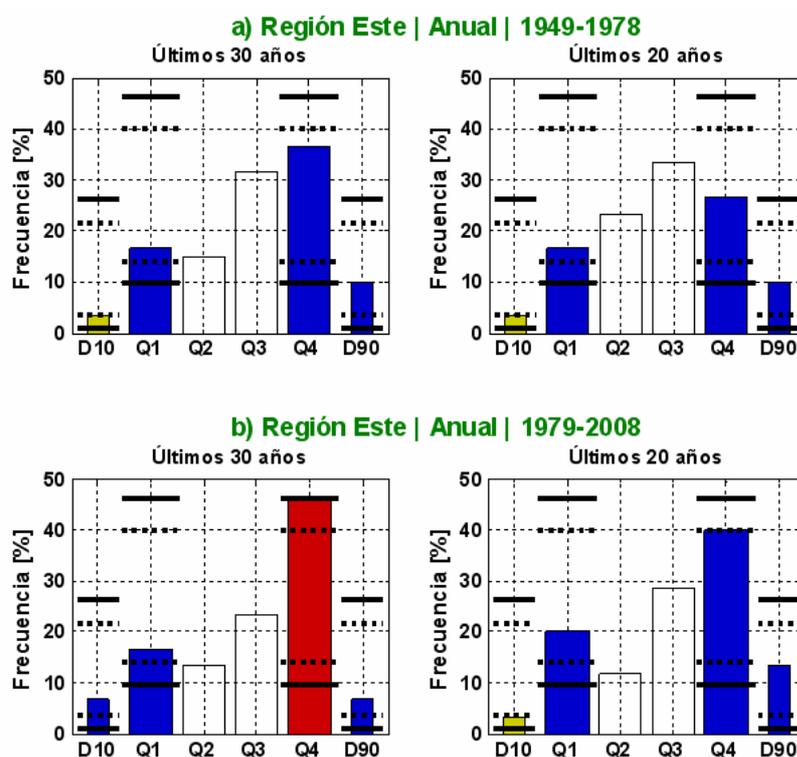


Figura 4. Idem Figura 3 para los períodos: a) 1949-1978 y b) 1979-2008 separadamente. Solo se presenta la Región Este y el clima estimado con N=30 y 20 años respectivamente. Los intervalos de significancia varían respecto de la Figura 3 por tratarse de 30 y no 60 años.

Según indica la Figura 4, los sesgos respecto del clima esperado son mayores (las tendencias más marcadas) en el período más reciente, resultado consistente con la literatura (Berbery et al, 2006), pero ya son notorias (aunque no estadísticamente significativa) en 1949-1978. Los sesgos en el período más reciente son mayores que considerando el período de 60 años completo, aunque la significancia estadística es menor por disponer de un menor número de casos (30 años). Aún estimando el clima con los últimos 20 años, la frecuencia del cuartil superior es 40% y la de los dos cuartiles superiores más de 68%.

Totales estacionales de precipitación

En la Introducción, y en la Tabla 1, se señaló la estacionalidad de las tendencias de la precipitación en la región, las cuales se concentran en la estación cálida (representada por el semestre Oct.-Mar.) y son más débiles o inexistentes –dependiendo de la región– en la estación fría (Abr.-Set.). En la Figura 5 se presentan los sesgos obtenidos con la misma metodología ya descrita para los totales estacionales de precipitación en cada región durante todo el período de estudio. Se muestran solo los resultados para el caso N=30.

Para las 3 regiones, los sesgos obtenidos en verano son mayores a los de invierno y semejantes a los que muestran los totales anuales (Figura 3). La frecuencia de los cuartiles extremos alcanza valores estadísticamente significativos solo en las regiones Noroeste y Este, tal cual sucedía con los totales anuales. En esas mismas regiones se observan también leves sesgos en invierno, aunque en su mayoría no significativos. Cabe destacar la muy alta frecuencia del decil superior en verano en las regiones Suroeste y Noroeste. En particular en la región Suroeste, donde ningún otro cuartil o decil extremo en ninguna estación muestra sesgos estadísticamente significativos, el decil superior en verano presenta una frecuencia mayor al 23% (significativo al 99%). Este resultado es un reflejo que las tendencias crecientes de precipitación en verano se explican en parte por la presencia de años extremadamente lluviosos.

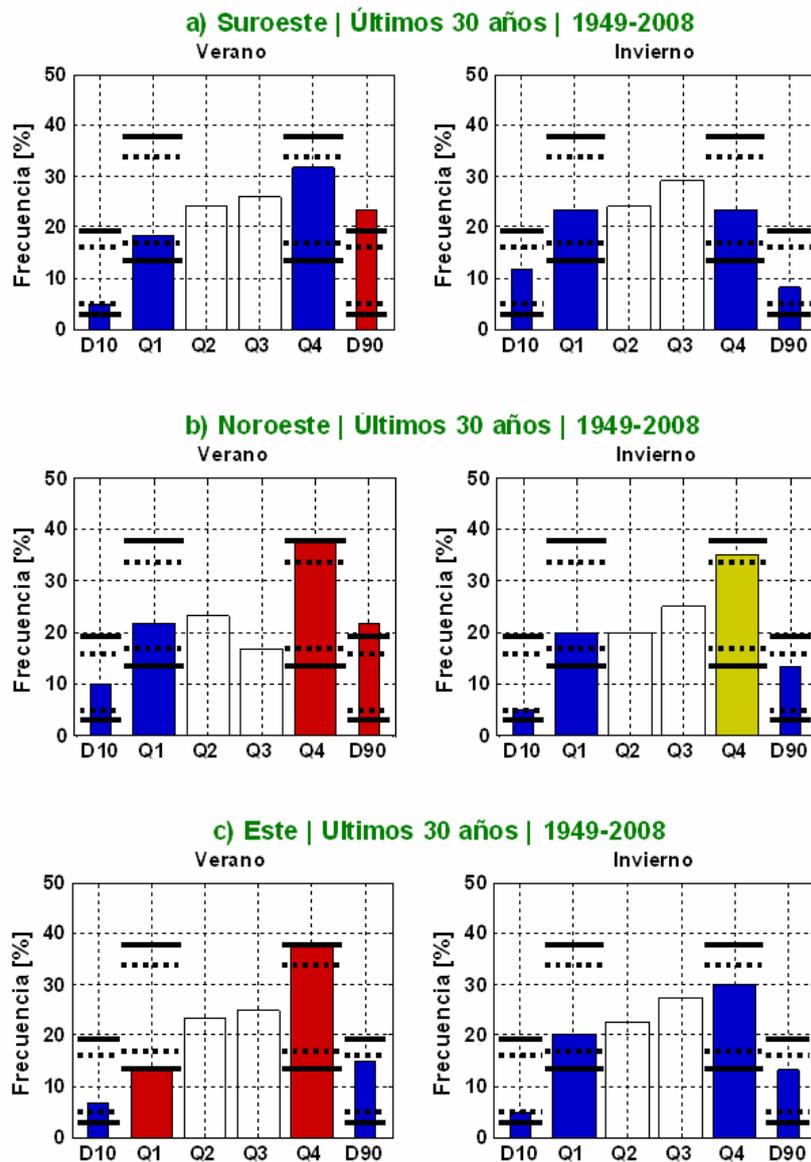


Figura 5. Idem Figura 3 para los totales estacionales de precipitación en Verano (Oct.-Mar.) e Invierno (Abr.-Set.), para las 3 regiones consideradas, y solamente estimando el clima en base a los últimos 30 años.

Implicancias en la interpretación de pronósticos estacionales del clima

En ocasiones existen circunstancias climáticas que permiten prever sesgos en la distribución esperada del clima (precipitación, temperatura) en una región y estación dada. Tal es el caso del impacto del fenómeno de El Niño - Oscilación Sur (ENOS - Aceituno, 1992) sobre el clima en diversas regiones del planeta (Ropelewski y Halpert, 1987, 1989). El sudeste de América del Sur (Montecinos et al. 2000), y en particular Uruguay (Pisciottano et al. 1994), es una de dichas regiones cuyo clima se ve condicionado por ENOS para ciertas estaciones del año, principalmente la primavera y el comienzo del verano.

Los pronósticos climáticos estacionales son necesariamente de naturaleza probabilística, por lo que consisten en sesgos en el clima esperado de una variable respecto de la distribución climatológica. En los pronósticos climáticos operacionales, es común que dichos sesgos se expresen en función de la probabilidad de ocurrencia de los terciles o cuartiles climatológicos que diferirán de lo que es esperable en ausencia de información de pronóstico: que cada uno de los terciles y cuartiles ocurra con probabilidad de 33% y 25% respectivamente.

Sin embargo, se ha mostrado que en un clima no estacionario –como el que se comprueba en la precipitación en Uruguay- se verifican sesgos en la ocurrencia de las sucesivas realizaciones que no pueblan uniformemente el clima tal cual se estima del pasado reciente. Más allá de la significancia estadística que se demostró en dichos sesgos, es notable comprobar que la magnitud de los mismos es comparable, e incluso mayor, a la que normalmente surge de pronósticos estacionales en base a predictores climáticos (por ejemplo ENOS).

Se diseñó, por tanto, un análisis cuyo objetivo es comparar - para distintas longitudes del período de datos considerado para definir el clima y con una misma metodología- los sesgos inducidos por las tendencias de largo plazo y por la señal de ENOS, predictor climático más importante de la precipitación en Uruguay. Se elige el índice N3.4 (promedio de la temperatura de superficie del mar en una región del Océano Pacífico ecuatorial) como representativo de ENOS (Trenberth, 1997). Se promedia dicho índice en el trimestre Nov.-Ene., temporada en que se verifica el máximo climatológico de los eventos extremos de ENOS. Por otro lado, se considera la precipitación trimestral simultánea en Uruguay, pues dicha temporada (Nov.-Ene.) coincide con la de mayor predictabilidad en la región (Pisciottano et al. 1994).

Como período para estimar el clima se consideró desde los últimos 10 años (1999-2008), incrementando año a año, hasta los últimos 90 años (1919-2008) de datos disponibles. Para cada longitud de período se estratificó los datos según:

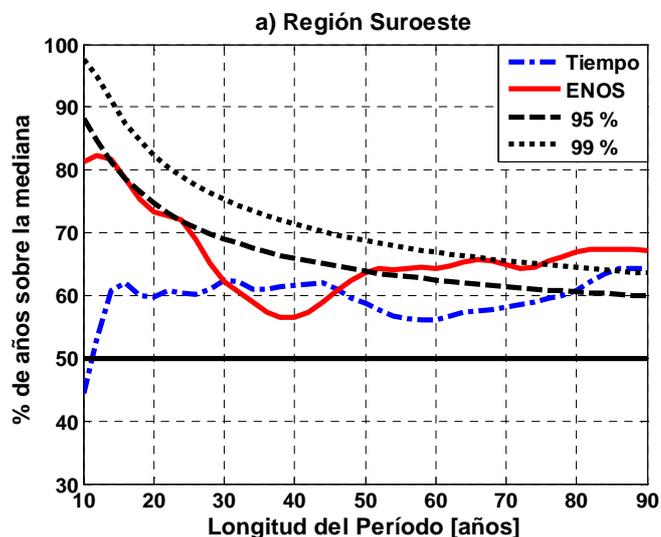
- (i) ENOS, repensado por el índice N3.4 en Nov.-Ene.
- (ii) el tiempo, ordenando los datos cronológicamente

A continuación se tomó como muestra la mitad superior de los años según las estratificaciones realizadas, es decir:

- (i) la mitad de los años con mayor índice N3.4
- (ii) la mitad de años más recientes

Por último, se contó el número de años en cada muestra que se sitúan por encima de la mediana del período considerado en esa instancia (de doble longitud que la muestra). Si más de la mitad de los años de la muestra caen por encima de la mediana del período, las estratificaciones realizadas están sesgadas hacia valores mayores de precipitación. La significancia estadística de dichos sesgos puede calcularse en función de la probabilidad de que ello ocurra por azar y depende solo del número de años en el período (y en la muestra que son la mitad).

Los resultados de los sesgos asociados con ENOS y con el tiempo se presentan en la Figura 6 para las tres regiones de trabajo y para períodos desde 10 a 90 años. También se indican los niveles de significancia al 95 y 99%.



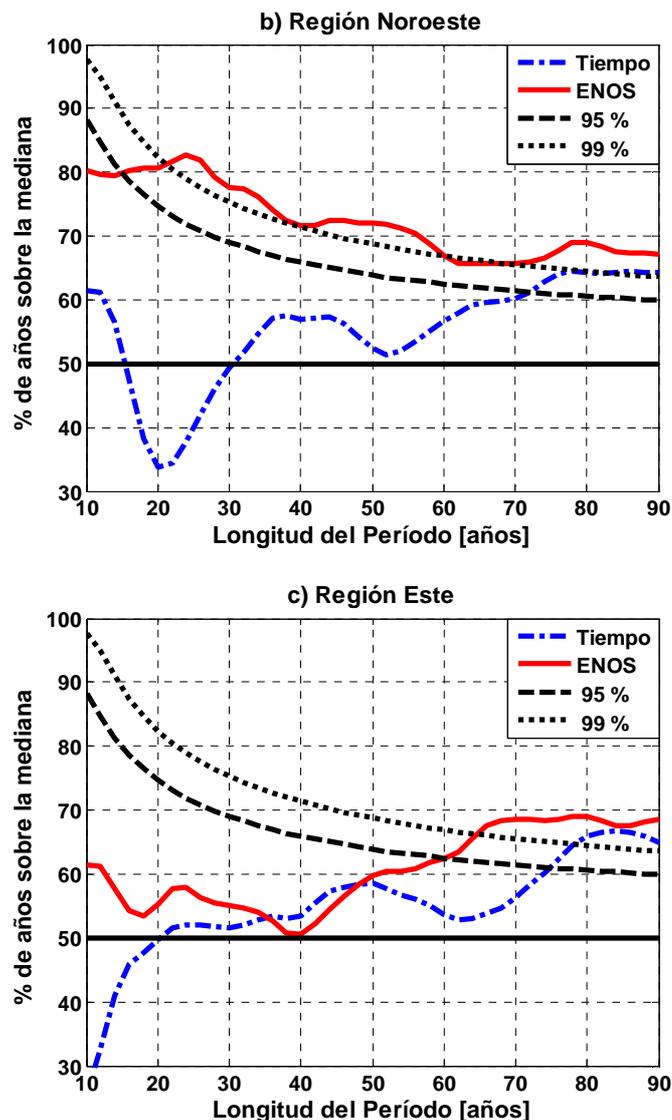


Figura 6. Porcentaje de años por sobre la mediana de precipitación estacional Nov.-Ene. en muestreos condicionados por ENOS (la mitad de años con mayor índice N3.4) y el Tiempo cronológico (la mitad de años más recientes) tomados de períodos de longitud variable (10 a 90 años) finalizando en el 2008. Los muestreos tienen siempre la mitad de años que el período, por lo que valores superiores a 50% implican sesgos en las muestras estratificadas. Se indican los niveles de 95% y 99% de significancia estadística. Todas las líneas están suavizadas con un filtro binomial de 5 puntos.

La señal más fuerte de ENOS (mayor índice N3.4 mayor precipitación) se da, como es sabido, en la región Noroeste, con sesgos significativos al 99% para todas las longitudes de período consideradas mayores a 15 o 20 años, en que lo reducido de los casos compromete la significancia estadística. En dicha región, y para períodos mayores a 70 años, el tiempo también sesga la precipitación significativamente y en amplitud semejante a ENOS. Sin embargo, para longitudes menores, el sesgo asociado al tiempo, si bien sigue siendo positivo, es menor y no significativo.

En la región Suroeste se observan resultados semejantes a la región Noroeste, aunque con una influencia un menor de ENOS y una mayor, aunque solo significativa para períodos mayores a 80 años, de la estratificación cronológica. La combinación de ambos aspectos hace que los sesgos por ENOS y por el tiempo sean comparables para períodos mayores a 30 años.

En la región Este la señal de ENOS (con esta metodología y en esta estación) solo es significativa para períodos mayores a 60 años y la del tiempo para períodos mayores a 75 años en que ambos sesgos son de magnitud comparable.

CONCLUSIONES

Es conocida la tendencia creciente de la precipitación en Uruguay y la región durante el último siglo y la estacionalidad de la misma. En este trabajo se analizan cuantitativamente las consecuencias de dichas tendencias en la práctica usual de estimar el clima esperado en base a la climatología histórica con diversas extensiones en el tiempo. Los resultados se expresan como sesgos en los deciles extremos y los cuartiles respecto de la distribución esperada y se verifica su significancia estadística. De los mismos se pueden derivar las siguientes conclusiones:

- En ningún caso se justifica la utilización de todo el registro disponible (en este estudio 90 años) para la estimación del clima esperado. Aún la práctica usual de tomar 30 años (e incluso 25 años) no parece aconsejable debido a que produce sesgos muy significativos (al 99%) en la frecuencia del cuartil superior en dos de tres regiones analizadas (Este y Noroeste).
- Con ciertas las variaciones regionales, los sesgos son más pronunciados en el período más reciente (1979-2008), aunque ya se manifiestan en el período anterior (1949-1978) sin significancia estadística.
- Las tendencias (y por tanto los sesgos) se concentran en la estación de verano (Oct.-Mar.) donde se destaca en las regiones Suroeste y Noroeste una muy alta frecuencia (hasta 23%) del decil superior (sesgo significativo al 99%).

De la comparación del sesgo inducido estratificando la precipitación de Nov.-Ene. según ENOS (cuya influencia en el clima de Uruguay en dicha estación es conocida) y según el tiempo cronológico, surge un buen ejemplo del compromiso que necesariamente implica la elección de la longitud del período de datos a usar para una aplicación en particular. Si se toman períodos muy largos, el sesgo inducido por la tendencia de largo plazo cobra significancia, como también se vio en los resultados comentados anteriormente. Si se toman períodos muy cortos, se pierde la significancia estadística de una señal conocida (como la de ENOS). En general, lo que se pierde es una buena representación del espectro de variabilidad climática. No hay una solución universalmente óptima para dicho compromiso que se deberá evaluar en cada caso.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Aceituno, P.** (1992): El Niño, the Southern Oscillation, and ENSO: Confusing names for a complex ocean-atmosphere interaction. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, **73**, 483-485.
- Berbery, E.H., M. Doyle y V. Barros** (2006). Tendencias regionales de precipitación. *El cambio climático en la Cuenca del Plata*. Eds. V. Barros, R. Clarke y P. Silva Dias. Capítulo 5, pp. 67-79.
- Menéndez, A. y H.E. Berbery** (2006). *Tendencias hidrológicas en la Cuenca el Plata*. Eds. V. Barros, R. Clarke y P. Silva Dias. Capítulo 6, pp. 81-92.
- Milly, P.C.D., J. Betancourt, M. Falkenmark, R.M. Hirsch, Z. W. Kundzewicz, D.P. Lettenmaier and R.J. Stouffer** (2008). Stationarity is dead: Whither Water Management? *Science*, Vol. 319, pp. 573-574.
- Montecinos, A., Díaz. A., y P. Aceituno** (2000). Seasonal diagnostic and predictability of rainfall in subtropical South America based on tropical Pacific SST. *J. Climate*, **13**, 746-758.
- PICC - Panel Intergubernamental del Cambio Climático** (2007). Informe de Síntesis (AR4).
- Pisciottano G., Diaz A., Cazes G. y Mechoso C. R.** (1994). Relationship between ENSO and Rainfall in Uruguay. *J. of Climate*, **7**, 1286-1302.
- Pielke, Jr., R.A.**, (2009). Collateral Damage from the Death of Stationarity, *GEWEX Newsletter*, May, pp. 5-7.
- Ropelewski, C. F., y M. S. Halpert** (1987). Global and regional scale precipitation patterns associated with the El Niño-Southern Oscillation. *Mon. Wea. Rev.*, **115**, 1606-1626.
- Ropelewski, C. F., y M. S. Halpert** (1989). Precipitation patterns associated with the high index phase of Southern Oscillation. *J. Climate*, **2**, 268-284.
- Trenberth, K. E.** (1997). The Definition of El Niño. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, **78**, 2771-2777.